

## **MODIFIKASI SISTEM LASER NITROGEN UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI GAS NITROGEN DAN DAYA KELUARAN LASER**

M Dula <sup>1)</sup>, Karyono <sup>2)</sup>, G. Maruto <sup>2)</sup>, dan A.B. Setio Utomo <sup>2)</sup>

1). FMIPA Universitas Haluoleo; 2). FMIPA UGM

### **INTISARI**

Telah dilakukan suatu modifikasi pada sistem laser nitrogen untuk meningkatkan efisiensi pemakaian gas nitrogen dan daya keluaran laser. Modifikasi dilakukan pada bentuk elektrode dan konstruksi celah laser, sedemikian sehingga gas nitrogen yang dipakai sedikit (efisien) tapi daya keluaran tinggi. Sebagai pembandingan digunakan konstruksi sistem laser nitrogen (sistem lama). Laser nitrogen yang dibuat (sistem baru) dapat dioperasikan pada daerah tegangan 7,48 kV sampai 10,30 kV. Sedangkan laser nitrogen (sistem lama) dapat dioperasikan pada daerah tegangan 6,96 kV sampai 11 kV.

Optimalisasi dilakukan pada jarak antar elektroda celah laser 1,98 mm, tegangan keluaran penyedia daya 9,17 kV, debit aliran gas 7,3 liter/jam dan menggunakan cermin datar pada salah satu ujung keluaran laser. Diperoleh bahwa sistem laser (sistem baru) menghasilkan daya keluaran laser maksimal 3,3 mW. Sedangkan sistem laser (sistem lama) menghasilkan daya keluaran laser maksimal 0,6 mW. Kondisi optimum tegangan keluaran penyedia daya diperoleh pada tegangan 8,64 kV (sistem baru) dan pada tegangan 9,54 kV (sistem lama).

Kata kunci: modifikasi, laser nitrogen, gas nitrogen.

## **THE MODIFICATION OF NITROGEN LASER SYSTEM TO INCREASE THE EFFICIENCY OF NITROGEN GAS AND THE LASER OUTPUT POWER**

Muliati Dula <sup>1)</sup>, Karyono <sup>2)</sup>, G. Maruto <sup>2)</sup>, dan A.B. Setio Utomo <sup>2)</sup>

### **ABSTRACT**

The modification of the nitrogen laser system has been done in order to increase the efficiency of the consuming nitrogen gas and laser output power. Modification has been done on the electrode form and the construction of the laser gap system (the new system), so that the consuming nitrogen gas is only a few (efficient) but high power output. As comparison, the old nitrogen laser system is used. The nitrogen laser (the new system) can be operated in the voltage range from 7.48 kV to 10.30 kV. Meanwhile, the nitrogen laser (the old system) can be operated in the voltage range from 6.96 kV to 11 kV.

The optimalization has been done on the electrodes laser gap of 1.98 mm, the power supply of 9.17 kV, the gas flow debit of 7.3 liters/hour and using a plan mirror at the one edge of laser output. As a result, the laser system produces the maximum laser output power of 3.3 mW, while the laser system (the old system) produces the maximum laser output power of 0.6 mW. The optimum condition of the power supply output voltage is obtained at 8.64 kV (the new system) and at 9.54 kV (the old system).

Key words: modification, nitrogen laser, nitrogen gas

## I. PENDAHULUAN

Bahan aktif laser yang dipilih adalah gas nitrogen dengan alasan bahwa selain pengadaan dan penanganan gas nitrogen relatif mudah, laser nitrogen merupakan salah satu laser (ultra ungu  $\lambda \sim 337,1$  nm) yang dapat dipergunakan untuk memompa laser zatwarna.

Baby dkk., (1991) meneliti tentang laser nitrogen daya tinggi dengan memodifikasi sistem aliran gas dan geometri lucutan. Setiawan (1999) telah membuat dan mengkarakterisasi sistem laser nitrogen yang telah dibuat tersebut. Namun masih terdapat beberapa kebocoran di dalam sistem laser tersebut sehingga menghabiskan banyak gas nitrogen (tidak efisien). Jufrida (2002) telah membuat sistem laser nitrogen yang lebih baik, lebih sedikit gas yang terpakai dan dapat dioperasikan dengan baik.

Pada penelitian ini, peneliti memodifikasi sistem laser nitrogen (sistem lama) dengan cara merancang bentuk geometri elektroda dan mengubah konstruksi laser nitrogen menjadi sistem baru sedemikian rupa sehingga dapat meningkatkan efisiensi pemakaian gas nitrogen dan daya keluaran laser. Sebagai pembanding adalah menggunakan sistem laser nitrogen (sistem lama). Kemudian mencari kondisi optimal dari parameter-parameter yang mempengaruhi daya keluaran laser nitrogen.

## II. TEORI DASAR LASER NITROGEN

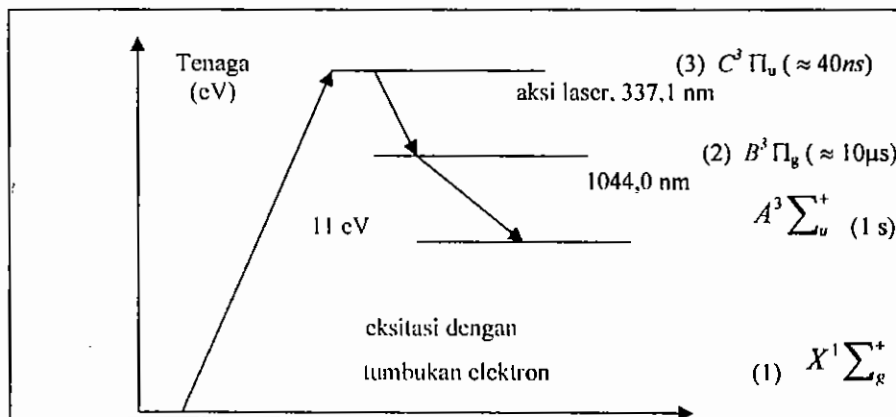
Laser nitrogen merupakan laser yang bahan aktifnya berupa gas. Dalam hal ini gas laser dieksitasikan dengan proses pemompaan secara elektrik yaitu pemompaan yang dilakukan dengan melewatkan arus yang cukup besar (lucutan listrik) di dalam gas.

Secara skematis diagram aras-arasa tenaga molekul nitrogen ditunjukkan oleh Gambar 1. Terlihat bahwa aras-arasa tenaga molekul nitrogen adalah  $X^1 \Sigma_g^+$ ,

$A^3\Sigma_u^+$ ,  $B^3\Pi_g$ , dan  $C^3\Pi_u$ . Sedangkan aksi laser pada molekul nitrogen terjadi pada dua kelompok transisi yaitu:

1. Transisi dari aras tenaga  $B^3\Pi_g$  ke aras tenaga  $A^3\Sigma_u^+$ , yang terletak di daerah panjang gelombang 741 nm - 1230 nm dan menghasilkan laser nitrogen infra merah.
2. Transisi dari aras tenaga  $C^3\Pi_u$  ke aras tenaga  $B^3\Pi_g$  yang menghasilkan laser nitrogen ultra violet dan terletak di daerah panjang gelombang 281,4 nm – 497,6 nm.

Selama pemompaan dengan lucutan listrik, molekul gas nitrogen tereksitasi dari tingkat tenaga dasar ke tingkat tenaga tereksitasi ke tiga. Kedua tingkat tenaga ini mempunyai perbedaan tingkat tenaga sekitar 11 eV. Beda tenaga antara aras tenaga  $C^3\Pi_u$  dan aras tenaga  $B^3\Pi_g$  3,6 eV yang menghasilkan radiasi ultra violet dengan panjang gelombang 337,1 nm.



Gambar 1. Diagram aras-aras tenaga molekul nitrogen tersederhanakan (Hilborn, 1976; Rodrigues dan Baumann, 1993; Maruto, 1998).

Menurut (Godard, 1974; Svelto dan Hanna, 1989) laser nitrogen pada panjang gelombang 337,1 nm dipandang sebagai laser tiga aras tenaga (tiga tingkat) yaitu  $X^1\Sigma_g^+$  (aras tenaga dasar, aras tenaga 1),  $B^3\Pi_g$  (aras tenaga bawah laser, aras

tenaga 2), dan  $C^3 \Pi_u$  (aras tenaga atas, aras tenaga 3). Sedangkan laju eksitasi tumbukan dapat dirumuskan sebagai (Rodriguest dan Baumann, 1993)

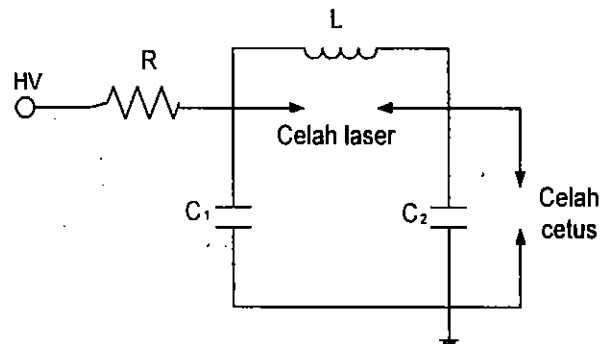
$$X = \langle \sigma v_e (W) \rangle_w n_e \quad (1)$$

yang bergantung pada tenaga, rerata  $v_e$  secara langsung ditentukan oleh medan listrik ( $E$ ), tekanan gas ( $p$ ) atau rapat molekul ( $N_n$ ) sebagai (Rodriguest dan Baumann, 1993):

$$\langle v_e \rangle \approx \sqrt{\frac{E}{p}} \approx \sqrt{\frac{E}{N_n}} \quad (2)$$

Terlihat dari persamaan 2 bahwa daya keluaran laser yang dihasilkan tergantung pada medan listrik ( $E$ ) dan tekanan gas ( $p$ ), disamping faktor geometri seperti panjang rongga laser dan bentuk elektroda celah laser. Medan listrik ( $E$ ) berbanding lurus dengan tegangan ( $V$ ) dan berbanding terbalik dengan jarak antar elektroda celah laser ( $d$ ). Semakin besar tegangan antar elektroda celah laser (tegangan keluaran HV) semakin besar daya keluaran laser.

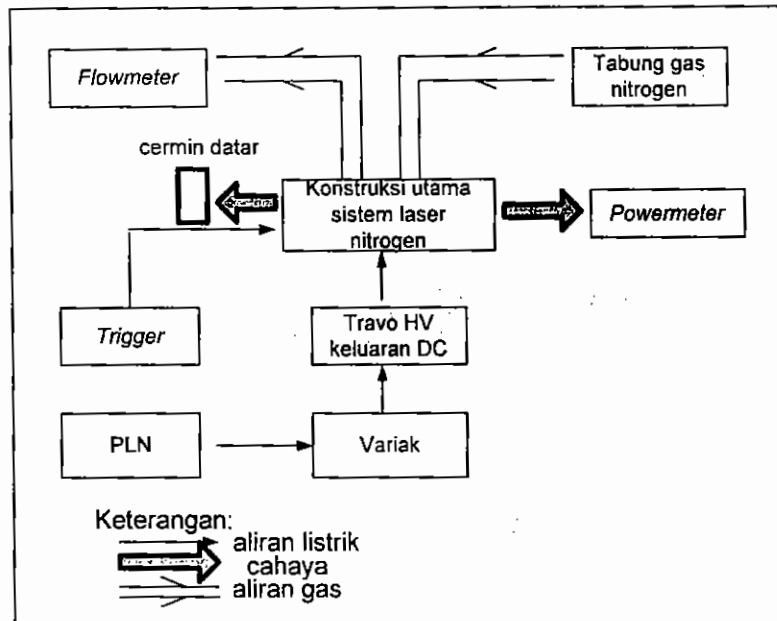
Sebagaimana telah disebutkan di muka, eksitasi dengan tumbukan elektron tersebut hanya berlangsung selama kurang dari 40 ns. Generator tegangan tinggi dengan induktansi kecil diperlukan supaya terjadi lucutan cepat tegangan tinggi. Salah satu sistem yang cocok untuk keperluan ini adalah rangkaian Blumlein, dengan menggunakan kapasitor plat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Blumlein

### III. METODE EKSPERIMEN

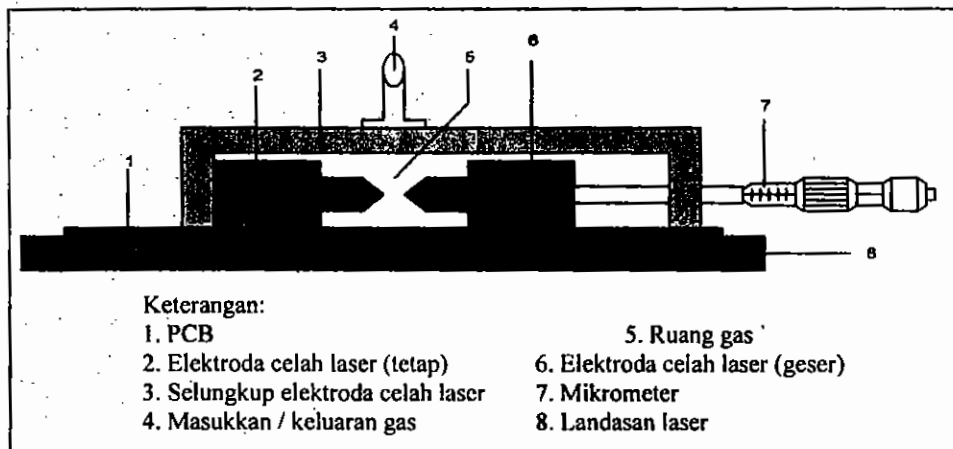
Skema peralatan untuk eksperimen ini ditunjukkan oleh gambar 3 yang terdiri dari sistem utama laser nitrogen, sumber daya tegangan tinggi, pemacu (*trigger*), sistem tabung gas nitrogen, *flowmeter*, *powermeter*, dan cermin datar.



Gambar 3. Diagram skematis susunan peralatan eksperimen

Sistem utama laser nitrogen merupakan gabungan dari komponen-komponen yang terdiri dari elektroda celah laser, plat kapasitor, dan elektroda celah cetus. Dari Gambar 3 gas nitrogen dialirkan ke dalam sistem laser dengan indikator tekanan aliran gas atau kecepatan aliran gas dengan menggunakan *flowmeter*. Untuk memberi tegangan pada kedua elektroda celah laser, sistem laser dihubungkan dengan trafo tegangan tinggi keluaran searah dengan tegangan masukannya dapat divariasi dari PLN melalui variak. Berkas laser yang dihasilkan oleh sistem laser setelah dipicu dengan unit pemacu (*trigger*), diarahkan ke detektor, dan daya keluaran laser dapat dibaca pada *powermeter*. Pada salah satu ujung keluaran diletakkan cermin datar guna menghasilkan keluaran satu arah (intensitas cahaya laser akan lebih kuat).

Pada penelitian ini dibuat dua elektroda celah laser (alat baru) dan diberi selungkup. Sedangkan dua elektroda celah laser (alat lama) dibuatkan selungkup guna mengatasi kebocoran-kebocoran dari dalam sistem laser. Kedua elektroda celah laser diletakkan di atas plat kapasitor. Bentuk geometri dari elektroda celah laser yang dibuat dapat pada gambar 4 dan bentuk geometri dari elektroda celah laser (alat lama) dapat dilihat pada gambar 5.

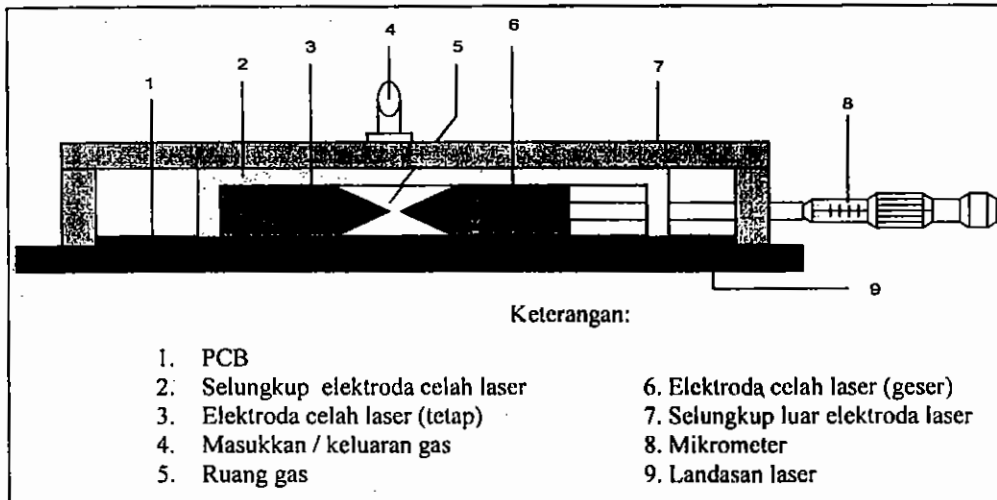


Gambar 4. Celah laser dan bagian-bagiannya (alat baru)

Pemilihan bentuk seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 didasarkan pada hasil penelitian dari Martinez dan Aboites (1993) yang memperoleh hasil bahwa dengan bentuk seperti yang ditunjukkan kedua gambar tersebut menghasilkan lucutan yang terjadi lebih seragam di sepanjang rongga celah laser.

Pada sistem baru elektroda laser terbuat dari aluminium dural dengan panjang 1000 mm dan diberi sudut ujungnya  $120^\circ$  dan pada alat lama elektroda laser terbuat dari aluminium dengan panjang 970 mm dan diberi sudut  $90^\circ$ . Elektroda yang satu dibuat tetap dan yang satu lagi dapat digeser dari luar dengan menggunakan mikrometer sekrup guna mengatur jarak antar kedua elektroda (lebar celah). Kedua elektroda diletakkan di atas plat kapasitor dan ditutup rapat dengan bahan plexiglas sehingga berbentuk selungkup. Dengan konstruksi seperti Gambar 4 dan Gambar 5 diasumsikan gas yang dipakai sedikit (efisien).

Setelah elektroda celah laser selesai dibuat di bengkel mekanik Jurusan Fisika FMIPA UGM, dapatlah kemudian disusun seperti pada Gambar (4). Kemudian dilakukan ekstrapolasi linier antara tegangan keluaran variak dengan tegangan keluaran HV, sedemikian sehingga diperoleh hasil tegangan variak vs tegangan keluaran HV untuk mengoperasikan laser nitrogen. (Dula , 2003)



Gambar 5. Celah laser dan bagian-bagiannya (sistem lama)

### 3.1. Pengukuran daya keluaran laser terhadap variasi kecepatan aliran gas dengan cermin datar di salah satu ujung keluaran laser

Pengukuran daya keluaran laser terhadap variasi kecepatan aliran gas menggunakan skema peralatan seperti Gambar 4. Waktu pengambilan data, tegangan keluaran variak tetap dan kecepatan aliran gas divariasikan. Setelah sistem laser nitrogen dioperasikan dan telah terjadi aksi laser, berkas laser yang dihasilkan diarahkan ke detektor. Besar daya keluaran laser dapat dibaca pada *powermeter*. Dengan bervariasinya kecepatan aliran gas menyebabkan daya keluaran laser juga bervariasi. Data pengukuran variasi daya keluaran laser terhadap kecepatan aliran gas yang diperoleh dicatat dan dibuat grafik variasi daya keluaran laser terhadap kecepatan aliran gas.

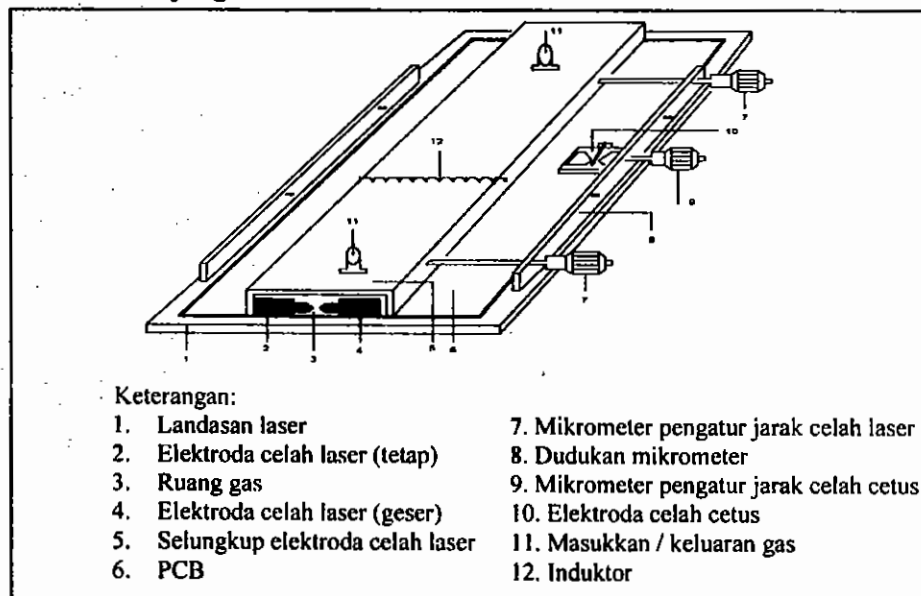
### 3.2. Pengukuran daya keluaran laser terhadap variasi tegangan keluaran HV dengan cermin datar pada salah satu ujung keluaran laser.

Hal yang sama dilakukan pada pengukuran daya keluaran laser terhadap variasi tegangan keluaran HV. Selama mengambil data kecepatan aliran gas dibuat tetap.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Modifikasi sistem laser nitrogen untuk meningkatkan efisiensi pemakaian gas nitrogen dan daya keluaran laser (alat baru dan alat lama) telah dilakukan. Kedua sistem laser nitrogen tersebut telah dapat dioperasikan dengan baik dengan menggunakan gas yang sedikit (efisien).

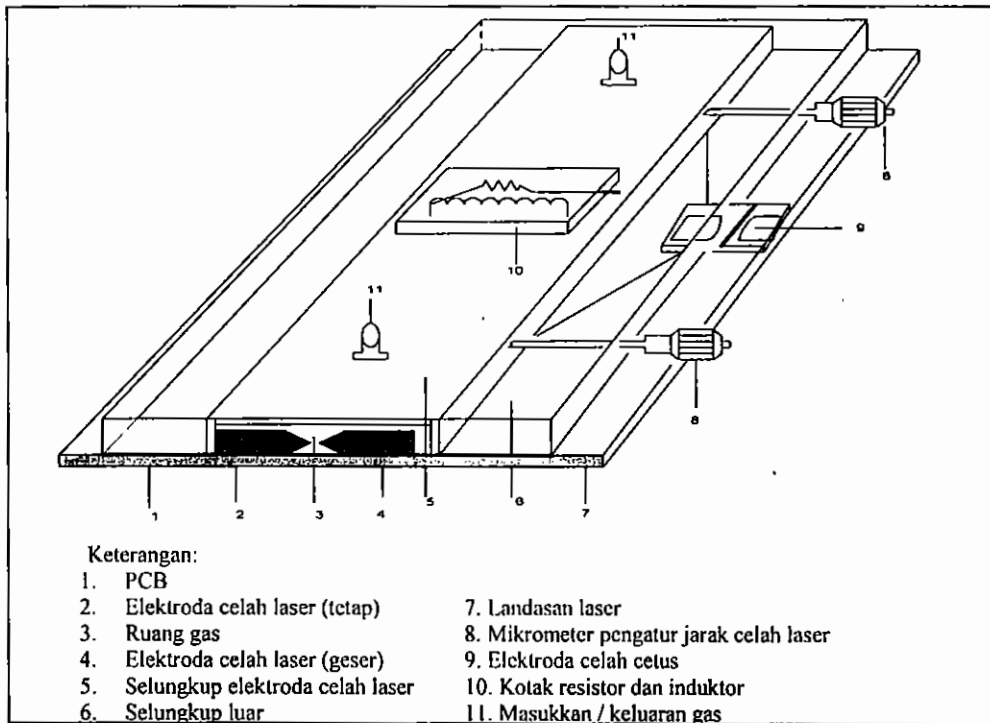
Bentuk konstruksi dari sistem laser nitrogen dapat dilihat pada Gambar 6 (alat baru) dan Gambar 7 (alat lama). Setelah elektroda celah laser terpasang dan terselungkupi dengan rapat, maka sistem utama laser nitrogen dapat dioperasikan sehingga terjadi aksi laser dan dapat dilakukan pengambilan data, meliputi variasi daya keluaran laser vs kecepatan aliran gas dan variasi daya keluaran laser vs tegangan antar elektroda celah laser (tegangan keluaran HV) dengan cermin datar pada salah satu ujung keluaran laser.



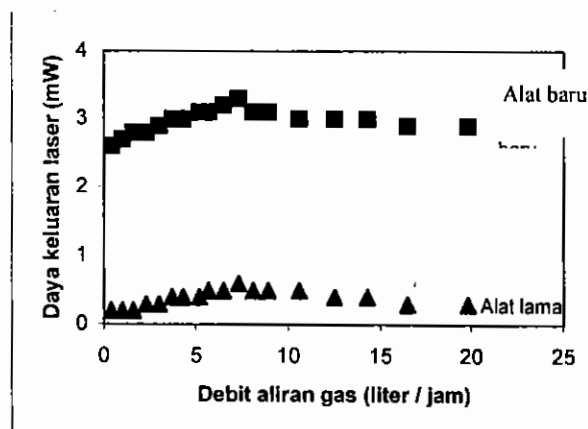
Gambar 6. Konstruksi dari sistem laser nitrogen (alat baru)



Data daya keluaran laser vs kecepatan aliran gas dilakukan pada tegangan keluaran HV 9,17 kV. Ketergantungan daya keluaran laser terhadap kecepatan aliran gas (dalam hal ini debit aliran gas) ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 7. Konstruksi dari sistem laser (alat lama)

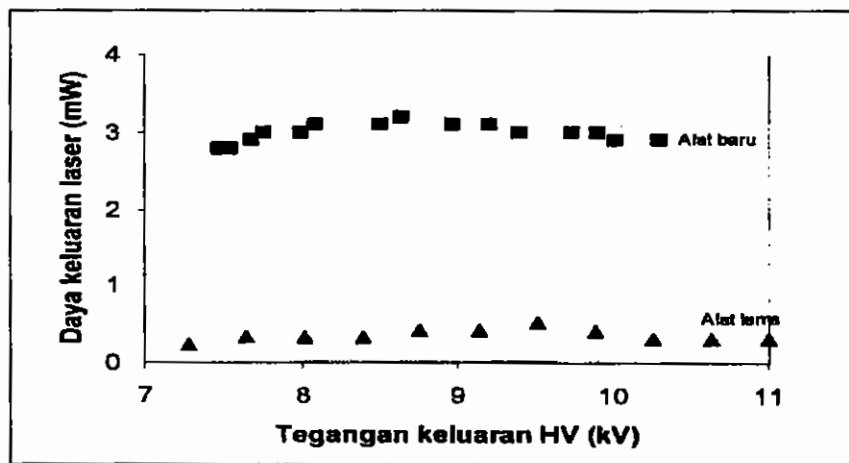


Gambar 8. Grafik variasi daya keluaran laser terhadap kecepatan aliran gas (dalam hal ini debit aliran gas) dengan cermin datar pada salah satu ujung keluaran laser dengan tegangan keluaran HV = 9,17 kV dan jarak antar elektroda celah laser ( $d$ ) = 1,98 mm (alat baru dan alat lama)

Dari grafik Gambar 8, variasi daya keluaran laser terhadap kecepatan aliran gas (dalam hal ini debit aliran gas) terlihat bahwa ada suatu debit aliran gas atau kecepatan alir gas optimal yang menghasilkan daya keluaran maksimal. Pada alat yang dibuat daya keluaran laser maksimal 3,3 mW dan pada alat lama daya keluaran laser maksimal 0,6 mW dengan debit aliran 7,3 liter/jam. Mula-mula daya keluaran laser meningkat dengan naiknya debit aliran gas. Adanya kenaikan tekanan gas dalam hal ini kecepatan aliran gas (debit aliran gas) akan menyebabkan cacah molekul yang tersedia bagi terjadinya inversi populasi bertambah, sedangkan  $\sqrt{E/p}$  masih cukup tinggi, sehingga mengakibatkan naiknya laju eksitasi molekul gas nitrogen. Gejala ini terjadi sampai suatu harga tekanan gas ( $p$ ) / kecepatan aliran gas (debit aliran gas) tertentu, yaitu 7,3 liter/jam. Jika tekanan gas lebih tinggi lagi, berarti akan semakin banyak (rapat) molekul gas nitrogen, sehingga  $\sqrt{E/p}$  jauh menurun dan elektron pembentuk kehilangan banyak tenaga yang diakibatkan oleh banyaknya benturan yang terjadi dengan molekul gas nitrogen. Dalam hal ini tenaga elektron masih relatif rendah karena baru sedikit bergerak (terlepas) dari bahan elektroda sehingga kurang efektif untuk mengeksitasi molekul nitrogen dan akan berakibat menurunnya laju eksitasi molekul nitrogen. Dengan menurunnya laju eksitasi molekul gas nitrogen mengakibatkan menurunnya daya keluaran laser nitrogen. Dari Gambar 8 terlihat bahwa daya keluaran laser mencapai maksimal untuk alat yang lama lebih rendah dari daya keluaran laser maksimal pada alat yang dibuat (sistem baru), sedangkan tegangan keluaran HV optimalnya sama yaitu 9,17 kV dan jarak antar elektroda celah laser juga sama yaitu 1,98 mm. Hal ini disebabkan oleh perbedaan nilai dari beberapa parameter dalam sistem laser nitrogen (rangkaiannya Blumlein). Parameter-parameter yang digunakan dalam rangkaian Blumlein tersebut adalah bentuk geometri elektroda celah laser, tegangan celah laser, kapasitansi, induktansi celah cetus, dan tahanan pembatas sumber daya tegangan tinggi. Perbedaan nilai dari beberapa parameter yang digunakan dalam rangkaian Blumlein (sistem baru dan sistem lama) memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap daya keluaran laser.

Selain itu pemberian cermin datar pada salah satu ujung keluaran laser dapat meningkatkan daya keluaran laser.

Data hasil penelitian variasi daya keluaran laser terhadap tegangan keluaran HV dengan cermin datar pada salah satu ujung keluaran laser (sistem baru dan sistem lama) dapat dilihat pada Gambar 9. Dari grafik pada Gambar 9, terlihat bahwa daya keluaran laser mula-mula naik dengan diperbesarnya tegangan keluaran HV. Pada alat baru tegangan keluaran HV mencapai 8,64 kV daya keluaran laser yang dihasilkan maksimal yaitu 3,2 mW dan pada alat lama tegangan keluaran HV mencapai 9,54 kV daya keluaran laser yang dihasilkan maksimal yaitu 0,5 mW. Setelah kondisi tegangan keluaran HV optimal tercapai untuk menghasilkan daya keluaran laser yang maksimal, daya keluaran laser menurun dengan diperbesarnya tegangan keluaran HV.



Gambar 9. Grafik variasi daya keluaran laser vs tegangan keluaran HV dengan cermin datar pada salah satu ujung keluaran laser (alat baru dan alat lama) dengan kecepatan aliran gas (dalam hal ini debit aliran gas) = 7,3 liter/jam dan jarak antar elektroda celah laser ( $d$ ) = 1,98 mm

Hal ini dapat terjadi karena mula-mula daya keluaran laser meningkat dengan naiknya tegangan masukan (V) (dalam hal ini tegangan keluaran HV), yaitu  $\sqrt{E/p} \approx \sqrt{V/dp}$  bahwa semakin besar perbandingan  $E/p$  berarti meningkatkan laju eksitasi molekul gas nitrogen, sehingga daya keluaran laser menjadi semakin besar. Hal ini terjadi sampai harga tegangan masukan tertentu. Jika tegangan

masukan diperbesar, daya keluaran laser menurun. Hal ini disebabkan dengan tingginya tegangan masukan berarti medan listrik antar kedua elektroda celah laser semakin besar. Dalam hal ini eksitasi yang banyak terjadi adalah eksitasi molekul nitrogen ke aras tenaga yang lebih tinggi, bahkan mengionkannya, sehingga aksi laser yang diharapkan dari transisi radiatif tidak dapat terjadi. Begitu pula dengan semakin besarnya tenaga elektron berarti kecepatannya semakin tinggi, kemungkinan terjadinya benturan antara elektron-elektron dengan molekul-molekul gas nitrogen berkurang. Hal ini menyebabkan daya keluaran laser berkurang. Dari Gambar 9 terlihat daya keluaran laser mencapai maksimal untuk alat yang lama lebih rendah dari daya keluaran laser maksimal pada alat yang baru dibuat. Sedangkan kecepatan aliran gas (debit aliran gas) optimalnya sama yaitu 7,3 liter/jam. Perbedaan daya keluaran laser dari kedua alat tersebut disebabkan oleh perbedaan bentuk geometri elektroda celah laser. Pada alat baru elektroda laser dibuat dengan sudut  $120^\circ$  konstruksi elektroda laser mempunyai sudut  $90^\circ$ . Perbedaan bentuk geometri elektroda celah laser berpengaruh terhadap daya keluaran laser (Martinez dan Aboites, 1993). Hal ini berkaitan dengan distribusi medan listrik  $E$  di dalam celah laser dan hal itu sangat ditentukan oleh bentuk geometri elektrodanya. Selain itu stabilitas lucutan utama juga sangat bergantung pada bentuk elektroda.

Pada pengoperasian sistem laser nitrogen alat yang baru dibuat mempunyai rentang tegangan keluaran HV yang relatif stabil adalah dari 7,48 kV sampai dengan 10,30 kV dan tegangan keluaran HV optimalnya yaitu 8,64 kV. Sedangkan pada pengoperasian sistem laser nitrogen (alat lama) mempunyai rentang tegangan keluaran HV yang relatif stabil adalah dari 6,96 kV sampai 11 kV dan tegangan keluaran HV optimalnya yaitu 9,54 kV. Perbedaan rentang tegangan keluaran HV (alat baru dan alat lama) ini disebabkan perbedaan nilai dari beberapa parameter dalam sistem laser nitrogen (rangkaian Blumlein). Pada nilai tegangan masukan semakin tinggi, rangkaian Blumlein mulai memperlihatkan adanya lucutan-lucutan yang tidak diinginkan terutama lucutan yang terjadi antara plat-plat kapasitor dan lucutan pada celah cetus, sehingga akan

menurunkan tegangan antar elektroda celah laser dan akibatnya akan menurunkan daya keluaran laser. Apabila dipaksakan untuk menaikkan tegangan masukkan berarti akan menaikkan tegangan antar elektroda celah laser dan juga akan memudahkan terjadinya lucutan antar plat-plat kapasitor sehingga akan merusak rangkaian laser nitrogen secara keseluruhan.

## **V. KESIMPULAN**

Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Modifikasi sistem laser nitrogen yang dilakukan telah menghasilkan peningkatan efisiensi gas nitrogen. Efisiensi gas dapat ditingkatkan dengan cara memberi selungkup hanya pada elektroda laser. Sedangkan daya keluaran laser dipengaruhi oleh bentuk geometri elektrodanya. Konstruksi elektroda laser pada sistem laser (alat baru) dibuat dengan sudut  $120^\circ$ , sedangkan pada sistem laser (alat lama) mempunyai sudut  $90^\circ$ . Hal ini terlihat pada perbedaan daya keluaran laser (alat baru dan alat lama) pada tegangan keluaran HV 9,17 kV dan debit aliran gas 7,3 liter/jam.
2. Variasi daya keluaran laser terhadap kecepatan aliran gas (dengan cermin datar pada salah satu ujung keluaran laser), pada alat baru berada pada tegangan keluaran HV = 9,17 kV dan menghasilkan daya keluaran laser maksimal 3,3 mW pada kecepatan aliran gas 7,3 liter/jam. Di lain pihak pada alat lama pada kecepatan aliran gas (dalam hal ini debit aliran gas) 7,3 liter/jam menghasilkan daya keluaran laser maksimal 0,6 mW.
3. Kedua sistem laser nitrogen ini pada kecepatan aliran gas (dalam hal ini debit aliran gas) 7,3 liter/jam tegangan optimal yang dicapai (alat baru) adalah 8,64 kV sedangkan tegangan optimal yang dicapai (alat lama) adalah 9,54 kV. Hal ini menunjukkan bahwa secara praktis operasional alat baru lebih baik dari pada alat lama.

## DAFTAR PUSTAKA

- Baby, T., Ramachandran, T., Sathianandan, K., Nampori, V. P. N., dan Valabhan, C. P. G., 1991, *High Power N<sub>2</sub> Laser with A Modified Gas Flow System and Discharge Geometry*, Rev. Sci. Instrum., Vol.62, no.9, p. 2078.
- Dula M, 2003, *Modifikasi sistem laser nitrogen untuk meningkatkan efisiensi gas nitrogen dan daya keluaran laser*, Thesis S-2 Fisika, Fak Pasca Sarjana, UGM, Yogyakarta.
- Godard, B., 1974, *A Simple High-Power Large-Efficiency N<sub>2</sub> Ultra Violet Laser*, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 10, no. 2, p.147.
- Hilborn, R.C., 1976, *An Inexpensive, Reliable, High-Power Molekul Nitrogen Laser*, Am. J. Phys., vol. 44, no. 12. P.1172.
- Jufrida, 2002, *Rancang Bangun Sistem Laser Nitrogen Untuk Meminimalkan Pemakaian Gas Nitrogen*, Tesis S-2 Program Studi Fisika Pascasarjana UGM, Yogyakarta.
- Martinez, A. V., dan Aboites, V., 1993, *High Efficiency Low Pressure Blumlein Nitrogen Laser*, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.29, no.8, p. 2364-2369.
- Maruto, G., 1988, *Kajian dan pengembangan Sistem Spektroskopi Laser Terpadu dan Terkomputerisasi*, Laporan Riset Unggulan Terpadu V (1997 – 1998).
- Rodriques, S.V., dan Baumann, W., 1993, *A Small Rugged Nitrogen Laser for Instrumentation*, Rev Sci. Instrum., vol. 64, no. 1, p. 63 – 64.
- Setiawan I., 1999, *Kajian Beberapa Paramer dan Karakterisasi Laser Nitrogen Buatan Sendiri*, Skripsi S-1, Fisika-FMIPA-UGM, Yogyakarta.
- Svelto, O. dan Hanna D, 1989, *Principles of Lasers*, Plenum Press, New York and London.